

Article, Published Version

Lambert, Hans

Die Erscheinung der Gezeiten und ihre Erklärung

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103082>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Lambert, Hans (1967): Die Erscheinung der Gezeiten und ihre Erklärung. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 25. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 81-93.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Dipl.-Ing. Hans Lambert

Die Erscheinung der Gezeiten und ihre Erklärung

Tide Phenomena and their Explanation



Nach einem Vortrag vor den bautechnischen Bediensteten der Küstendirektionen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung anlässlich einer Tagung bei der WSD Kiel.

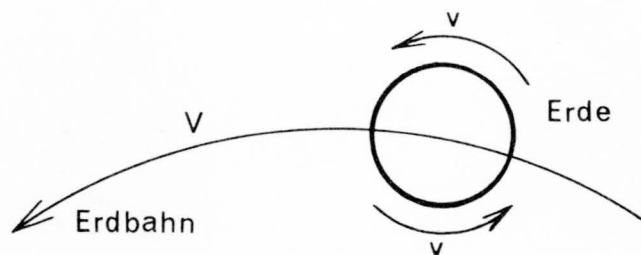
In allen großen Meeren hebt und senkt sich täglich regelmäßig der Wasserspiegel. Man nennt diese Erscheinung die Gezeiten oder die Tide und ihren Verlauf Ebbe und Flut.

Unter Flut verstehen wir das Steigen des Wassers, unter Ebbe sein Fallen. Keine Meeresküste ist frei von Ebbe und Flut, wenngleich sich diese teilweise nur als schwache Schwankung bemerkbar macht.

Das Heben und Senken der Meeresoberfläche wird von einem Hin- und Herfluten der Wassermassen begleitet. Beide Erscheinungen haben dieselbe Periode und gehören zusammen. Sie sind die Folge einer wellenförmigen Bewegung des Wassers, deren Ursache bis an die Schwelle der Neuzeit unbekannt blieb.

Die erste, uns modern ansprechende Gezeitentheorie stammt von GALILEO GALILEI (1564 - 1642) mit dessen Namen heute der Beginn einer neuen sich auf das Experiment stützenden Physik verbunden wird. Ausgehend von der Kopernikanischen Lehre von der Bewegung der Erde um die Sonne, die er durch die beobachtete Bewegung der Jupitermonde als bewiesen fand, erklärt er das Flutphänomen aus der Erdbewegung.

Es ist bekannt, daß in Behältern transportiertes Wasser hin und her schwappt, je nachdem ob die Geschwindigkeit erhöht oder vermindert wird. Indem sich die Erde einmal um ihre Achse dreht, zum anderen aber in ihrer Bahn um die Sonne fortschreitet, müssen sich für die einzelnen Punkte auf der Erdoberfläche Umlaufgeschwindigkeit und Fortschrittsgeschwindigkeit (Abb. 1) einmal addieren und einmal subtrahieren. Entsprechend dieser Geschwindigkeitsänderung, die den Perioden der Erddrehung entspricht, muß auch ein periodisches Hin- und Herschwappen der Wassermassen in den Ozeanen einsetzen, was wir als die Gezeiten bezeichnen.



$V+v \rightarrow$ Zurückbleiben des Wassers = Ebbe
 $V-v \rightarrow$ Vorschnellen des Wassers = Flut

Abb. 1

JOHANNES KEPLER (1571 - 1630) hingegen vermutete, daß man bei der Erklärung der Gezeiten nicht vom Monde absehen dürfte, so lange es möglich sei, auf ihn die Deutung zurückzu-

führen. Wie aber sollte man die Wirkung des Mondes verstehen, wenn das Gesetz der gegenseitigen Massenanziehung noch nicht erkannt war ?

Die besondere Leistung des ISAAC NEWTON (1642 - 1727) war die Erkenntnis und Formulierung des Gesetzes der Massenanziehung oder des Gravitationsgesetzes

$$K = f \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

K = Kraft

f = Gravitationskonstante

m_1, m_2 = Massen

r = Abstand der Massenmittelpunkte

Aufgrund der Massenanziehung zwischen den Himmelskörpern kann nun auch das Phänomen der Gezeiten erklärt und verstanden werden.

Betrachtet man zunächst Erde und Mond allein und sieht von der Eigendrehung der Erde ab, so bewegen sich Erde und Mond monatlich einmal um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Die dadurch auftretenden Zentrifugalkräfte befinden sich mit der Gesamtheit der zwischen den Massen bestehenden Anziehungskräfte im Gleichgewicht. Dieses Gleichgewicht besteht aber nicht für die einzelnen Punkte der Erdoberfläche.

Die Existenz von Kräften zeigt sich in Beschleunigungen. Wenn für die einzelnen Punkte der Erdoberfläche das Gleichgewicht zwischen Massenanziehung und Zentrifugalkraft nicht besteht, müssen Beschleunigungen auftreten.

Weil alle Punkte der Erde bei der Bewegung mit dem Mond um den gemeinsamen Schwerpunkt gleiche Bahnen beschreiben, kann die Erde als starrer Körper nur eine bestimmte Beschleunigung, die Zentrifugalbeschleunigung, gegen den Mond annehmen, während die beweglichen Wassermassen auf der dem Mond zu- und der ihm abgewandten Seite verschiedene Beschleunigungen erhalten (Abb. 2).

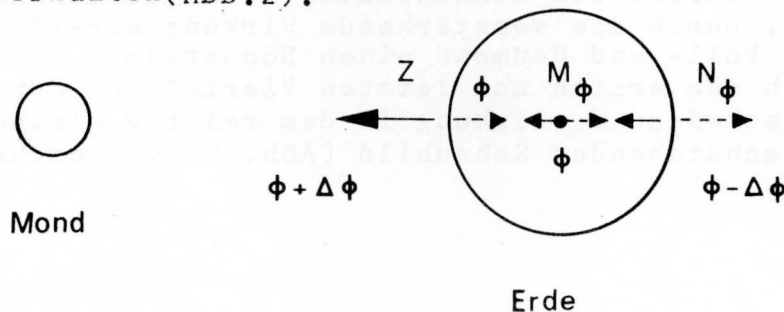


Abb. 2

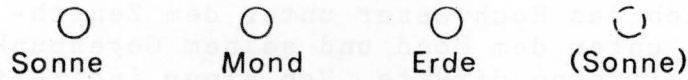
| | Zenith | Mittelp. | Nadir |
|---|------------------------|----------|------------------------|
| Beschleunigung der freien Punkte zum Mond | $-(\phi + \Delta\phi)$ | $-\phi$ | $-(\phi - \Delta\phi)$ |
| Schwerebeschleunigung zum Erdmittelpunkt | $+g$ | 0 | $-g$ |
| Zentrifugalbeschleunigung | $+\phi$ | $+\phi$ | $+\phi$ |
| Beschleunigung gegen die Erde | $+(g - \Delta\phi)$ | 0 | $-(g - \Delta\phi)$ |

Im Zenith- und Nadirpunkt sind die zum Mittelpunkt hin gerichteten Beschleunigungen geringer als die Schwerebeschleunigung g oder mit anderen Worten: Die Wassergewichte sind im Zenith- und Nadirpunkt um den gleichen Betrag vermindert. Hier treten die Flutberge auf, zwischen denen sich die Ebбетäler einstellen müssen.

Die Wassermassen der Ozeane vermögen diesen Flutkräften vollständig nachzugeben, weswegen in allen Meeren der Erde die Gezeiten als vertikale Verlagerung des Meeresniveaus auftreten.

Eine gleichartige, doch wesentlich schwächere Wirkung geht auch von der Sonne und grundsätzlich auch von allen anderen Himmelskörpern aus. Merklich ist aber nur noch der Einfluß der Sonne. Da die flutbildende Kraft des Mondes $2 \frac{1}{4}$ mal größer als die der Sonne ist, herrschen die Mondfluten vor, während die Sonnenfluten diese verstärken oder abschwächen. Durch die verstärkende Wirkung erreicht der Tidenhub nach Voll- und Neumond einen Höchstwert, den Springtidenhub; nach dem ersten und letzten Viertel des Mondes zeigt sich die abschwächende Wirkung in dem relativ kleinen Nipptidenhub. Nachstehendes Schaubild (Abb. 3) veranschaulicht die Wirkung.

Springflut



Nippflut

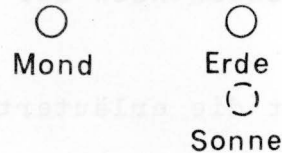


Abb. 3

Soweit können die Erscheinungen der Gezeiten von der NEWTON'schen Theorie, die auch die statische oder Gleichgewichtstheorie genannt wird, befriedigend erklärt werden.

Die Erde hat aber Eigendrehung und während das Meer diese Bewegung mitmacht, bleiben die Flutberge relativ zum Mond stehen. Zur Erhaltung dieser Flutberge müssen sich folglich die Wassermassen verlagern, d.h. die an der Erddrehung teilnehmenden Flüssigkeitsteilchen müssen zusammenströmen. Die so gebildeten Flutberge können natürlich nicht unbegrenzt wachsen, da die Wassermassen als Folge der Neigung des Meeresniveaus wieder in ihre Ruhelage zurückströmen.

Die NEWTON'sche Theorie fordert in jedem Augenblick ein Gleichgewicht der fluterzeugenden Kräfte mit den die Wassermassen in ihre Ruhelage zurückdrängenden Kräften. Der Mond ändert aber seine Stellung zur Erde ständig und damit ändern sich auch die Flutdeformationen. Das geforderte Gleichgewicht bedingt so große Wasserumlagerungen mit entsprechenden Strömungsgeschwindigkeiten wie sie nie beobachtet wurden.

Das von der Theorie NEWTON's in jedem Augenblick geforderte Gleichgewicht zwischen fluterzeugenden Kräften und Druckkräften ist unmöglich. Weiter ist sie unvollständig, weil sie die möglichen Eigenschwingungen des Meeres nicht berücksichtigt.

Diese Lücken waren für PIERRE SIMON LAPLACE (1749-1827) der Anlaß, die NEWTON'sche "statische" Theorie durch eine "dynamische" Theorie der Gezeiten zu ersetzen. Nicht zum Mond feststehende Flutberge werden erzeugt sondern Flutwellen.

Die Eigendrehung der Erde bestimmt den periodischen Charakter der Flutkräfte und damit die Perioden der Flutwellen, deren Amplituden und Phasen aber von den Eigenschwingungen des Meeres mitbestimmt werden. Die Flutwellen sind erzwungene Schwingungen, die um so stärker werden, je näher die Perioden der Flutkraft und die der Eigenschwingung des Meeres zusammenliegen.

Haben Flutkraft und Meeresschwingung die gleiche Phase, so folgt die Flutwelle dem scheinbaren Umlauf des Mondes, stellt sich das Hochwasser unter dem Zenith- und Nadirpunkt ein, d.h. unter dem Mond und seinem Gegenpunkt. Man nennt diese Gezeit eine direkte. Von einer indirekten Gezeit spricht man bei einer Phasenverschiebung von 6 Stunden, bei der das Hochwasser rd. 6 Stunden nach der Kulmination des Mondes eintritt.

LAPLACE faßt die erläuterten Bewegungsvorgänge in dem Satz zusammen:

"Die Bewegungen eines Punktsystems, dessen ursprüngliche Bedingungen durch den Widerstand, den die Bewegung erfährt, vernichtet sind, sind periodisch wie die Kräfte, die die Bewegung erhalten."

Das von ihm entwickelte Gezeitenbild geht von dem Modell eines den Erdball umspannenden Weltozeans von 10 km Tiefe aus. Dieser Weltozean besitzt die verschiedensten Eigenschwingungen, die wegen der Drehung der Erde um ihre Achse mit der geographischen Breite variieren. Zerteilt man nun diesen Ozean längs der Breitenkreise in schmale Kanäle, die keine Verbindung miteinander haben, so haben diese Kanäle unterschiedliche Eigenschwingungen und daraus folgend unterschiedliche Gezeiten. LAPLACE kommt zu dem Ergebnis, daß die Gezeiten in den äquatornahen Kanälen indirekte und in den polnahen Kanälen direkte sind. Dazwischen stellt sich der "Resonanzfall" (d.h. das Übereinstimmen der Perioden) zwischen Flutkraft und freier Welle mit den daraus folgenden großen Gezeitenhöhen ein. Nimmt man die Scheidewände weg, müssen sich die Wasserunterschiede zwischen den einzelnen Kanälen durch Ströme von Norden nach Süden und umgekehrt ausgleichen, und das Bild der Gezeiten wird sehr verworren sein. LAPLACE hat gezeigt, daß auch nach Fallen der Scheidewände zwischen den Kanälen die Gezeiten in Äquatornähe stets indirekt, in Polnähe stets direkt sein müssen. Wenn gleich dieses Gezeitenbild nicht dem der Wirklichkeit entspricht, so hat es doch das Verständnis für die Meeresgezeiten vertieft und geholfen, die Faktoren zu erkennen, die berücksichtigt werden müssen, wenn man von den Gezeiten des Modells zu den wirklichen Gezeiten gelangen will.

In Wirklichkeit haben wir keinen den Erdball bedeckenden Ozean gleicher Tiefe und - wie längere Pegelaufzeichnungen zeigen - haben die Gezeiten wiederkehrende Ungleichheiten, die sich aus der Bewegung des Mondes und der Sonne herleiten.

Die sich am stärksten bemerkbar machenden Ungleichheiten sind die schon erläuterten Spring- und Nipptiden, welche grundsätzlich dadurch entstehen, daß Mond und Sonne ihre Stellung zueinander und in bezug auf die Erde ständig ändern. Die Periode dieser Schwankung beträgt im Durchschnitt 14,77 Tage, d.h. etwa einen halben Monat.

Weiter ergibt die geringfügige aber stetige Änderung der Entfernung Erde - Mond bei ihrem monatlichen Umlauf um den gemeinsamen Schwerpunkt eine monatlich wiederkehrende Ungleichheit in den Gezeiten. Die Erdnähe bringt einen erhöhten Tidenhub, die Erdferne einen niedrigeren. Fällt die Erdnähe mit Voll- und Neumond zusammen, d.h. in die Zeit der Springtide, dann wird der Springtidenhub besonders hoch. Entsprechend läuft die Nipptide bei Erdferne des Mondes relativ niedrig auf.

Unterschiede im Tidenhub zeigen sich auch infolge der sich ändernden Deklination des Mondes. Steht der Mond am Himmelsäquator, ist seine Deklination Null. Von hier wandert er auf die Nord- und dann auf die Südhemisphäre. Die Zeitspanne, während welcher der Mond seine Stellung von der größten nördlichen bis zur größten südlichen Deklination ändert, beträgt 13,66 Tage, d.h. fast einen halben Monat. Die Deklinationsungleichheit des Mondes bedingt einen unterschiedlichen Tidenhub. Nach seiner größten nördlichen und größten südlichen Deklination ist der Tidenhub verhältnismäßig klein, nach seinem Äquatordurchgang aber verhältnismäßig groß.

Als weitere Folge der Deklination des Mondes haben die fluterzeugenden Kräfte eine zum Erdäquator unsymmetrische Lage, und die Flutberge sind nicht mehr symmetrisch zur Drehachse der Erde gelagert. So entsteht bei der Rotation der Erde eine tägliche Ungleichheit der Gezeitenwelle, die an einer abwechselnden Erhöhung und Erniedrigung der Hoch- und Niedrigwasserstände zu erkennen ist. Die Höhenunterschiede haben ihr Maximum mit der größten nördlichen oder südlichen Deklination und verschwinden mit dem Äquatordurchgang des Mondes.

Eine weitere Ungleichheit der Gezeiten, die aber hinter den genannten zurücktritt, folgt den Sonnen- und Mondfinsternissen, die eine Periode von 18 Jahren und 11 Tagen haben.

Trotz dieser Ungleichheiten bei den gezeitenerzeugenden Kräften und trotz der Unterschiede zur Wirklichkeit, die einem Modell des Weltozeans gleicher Tiefe anhaften, hat die von LAPLACE entwickelte Theorie der Gezeiten die Grundlage der Vorausberechnung ihres Ablaufes geliefert; denn jede Gezeitenerscheinung, so verwickelt sie auch immer sei, sie folgt den Perioden von Mond und Sonne, die sie hervorrufen.

Hieraus erwächst die Möglichkeit, die Tidebewegung im voraus zu bestimmen, indem ihre periodisch wiederkehrenden Änderungen mathematisch als die Summe einzelner harmonischer Schwingungen dargestellt werden kann. Durch Auflösung einer beobachteten Gezeit in ihre harmonischen Einzelschwingungen, den sogenannten Teil- oder Partialtiden, kann die künftige Gezeit durch Superposition der Partialtiden berechnet werden.

Die beobachteten Gezeiten sind aber nicht identisch mit den durch die Flutkraft erzwungenen Schwingungen. Durch Bodentopographie, Reibung und Corioliskraft sind diese Schwingungen umgeformt.

Die Corioliskraft, benannt nach dem französischen Physiker GASPARD GUSTAVE CORIOLIS (1792-1843), der sie zuerst erkannte, ist eine Folge davon, daß alle unsere Bewegungen nicht auf einer ruhenden sondern einer sich drehenden Erdkugel ablaufen. Durch Abnahme der Peripheriegeschwindigkeit der Erdoberfläche zum Pol hin erfährt jede Bewegung auf der Nordhalbkugel eine Rechtsablenkung, auf der Südhalbkugel eine Linksablenkung.

Die durch die genannten Einflüsse umgeformten Schwingungen sind die beobachteten Gezeiten. Da diese trotz der Veränderungen stets in derselben Weise ablaufen und somit auch die für einen Küstenort beobachteten Gezeiten ihre Charakteristik beibehalten, ist die Vorausberechnung der Gezeiten aufgrund von Beobachtungsdaten möglich. Voraussetzung ist allerdings eine genügend lange Beobachtungszeit (mindestens 1 Jahr).

Die sich auf Beobachtung stützende Vorausberechnung der Gezeiten geht auf einen Vorschlag von WILLIAM THOMSON (Lord KELVIN, 1824-1907) zurück, der 1868 vorschlug, die harmonischen Gezeiten-Konstanten, das sind die Perioden, Amplituden und Phasen der Partialtiden, empirisch zu bestimmen und dann den Verlauf der Gezeiten aus den Partialtiden zu berechnen.

Man nennt dieses Verfahren die harmonische Analyse der Gezeiten bzw. der Gezeitenbeobachtung. Sie hat in Meeresgebieten mit einem im Verhältnis zur Wassertiefe kleinen Tidenhub befriedigende Ergebnisse gebracht. In Schelfmeeren, Seichtwassergebieten und Flußmündungen hat sie sich nicht bewährt. Hier wirken sich die der Tideschwingung überlagerten Oberschwingungen stärker aus, so daß die Ermittlung der Partialtiden aus beobachteten Wasserstandskurven ihren Sinn verliert. Man muß sich auf wesentlich längere Beobachtungsreihen stützen und die Tidekurve im ganzen betrachten. Aber auch hier hängen die Ungleichheiten der Gezeiten in Höhe und Zeit von astronomischen Größen ab, weswegen man die Beobachtungen möglichst über 19 Jahre erstreckt, d.h. über den ganzen Zeitraum der Wiederkehr von Sonnen- und Mondfinsternissen. Dieses empirische Vorhersageverfahren ist das sogenannte nonharmonische Verfahren, mit dem es gelungen ist, auch in flachen Meeresteilen die Gezeiten in befriedigender Weise vorher zu bestimmen.

Aus den bisherigen Ausführungen wurde ersichtlich, daß die Gezeiten zwar als astronomisches Phänomen erklärt werden können, ihre reine astronomische Vorherbestimmung scheiterte an ihrer Mannigfaltigkeit. Zwar gelang es LAPLACE von der Vor-

stellung eines den Erdball bedeckenden Ozeans ausgehend, die Gezeiten als erzwungene Schwingungen darzustellen und manche Eigentümlichkeiten der Tiden der Stadt Brest zu erklären. Seine dynamische Gezeitentheorie hat sich auch für die Folge sehr fruchtbar erwiesen; zu einer Darstellung der Meeresgezeiten auf der Grundlage der gezeitenerzeugenden Kraft gelangte man nicht, da die Bodentopographie die Gezeiten zu sehr veränderte. Die Gezeitenvorhersage mußte deswegen von Gezeitenbeobachtungen ausgehen, aus denen dann die für den jeweiligen Küstenplatz gültigen Amplituden und Phasen der Partialtiden abgeleitet werden konnten.

Wenngleich die harmonischen Konstanten der Partialtiden zahlreicher Küstenorte und Inseln und damit das Verhalten der Gezeiten längs der Küste bekannt sind, so reicht dieses Kenntnis nicht aus, um über das Meer hinweg die Gezeiten richtig darzustellen.

Angesichts dieser Tatsache ist es verständlich, wenn mit Beginn des vorigen Jahrhunderts eine von den Gezeiten in den Randmeeren ausgehende geographische Betrachtungsweise an Boden gewinnt.

THOMAS YOUNG (1773-1839) war bestrebt, eine einfachere und den Beobachtungen besser entsprechende Gezeitentheorie zu entwickeln. Er ging hierzu von den irdischen Verhältnissen aus und untersuchte, welche Schwingungen ein kleineres Meeres- oder Seebecken unter dem Einfluß der Gezeitenkräfte des Mondes und der Sonne ausführen müßte. Da diese wegen der relativ geringen Ausdehnung solcher Becken nur unbedeutend sein konnten, schloß er, daß die in den meisten Nebenmeeren herrschenden Gezeiten nicht in diesen selbst entstanden sein konnten, sondern die Gezeitenimpulse vom großen Ozean ausgelöst wurden, wodurch die Wassermassen des Meeresbeckens in Schwingungen geraten. Man nennt sie die Mitschwinggezeiten im Gegensatz zu den unmittelbar von Mond und Sonne angeregten Gezeiten, die auch in den begrenzten Becken auftreten, aber im allgemeinen in ihrer Wirkung hinter den Mitschwinggezeiten zurückbleiben.

Mit der in das Meeresbecken einlaufenden Gezeitenwelle ist noch eine Wasserbewegung, ein Gezeitenstrom, verbunden. Diese würde auf einer ruhenden Erde in einem Hin- und Herbewegen der Wasserteilchen bestehen; auf einer bewegten Erde aber werden die Wasserteilchen durch die ablenkende Kraft der Erdrotation, durch die Corioliskraft, in eine umlaufende Bewegung versetzt, wodurch sie gegen die Ufer drängen und die Wellenoberfläche und damit das Hochwasser verändern.

In einem langen schmalen, an den Enden offenen Kanal würde diese umlaufende Bewegung der Wasserteilchen unterbleiben, die Bewegungen blieben geradlinig, aber die Welle würde als Folge der Corioliskraft an einem Ufer höher auflaufen als

am anderen. Zu den ursprünglichen Längsschwingungen kämen Querschwingungen, welche die Längsschwingungen überlagern. Eine solche Welle wird nach ihrem Entdecker Kelvin-Welle genannt. In ihr besteht ständig Gleichgewicht zwischen der Corioliskraft und dem Wassergefälle, so daß keine Querströmungen vorhanden sind.

Die kartographischen Verbindungslinien der Orte gleichen Hochwassers nennt man die Flutstundenlinien. Das Bild dieser Linien in einem einseitig offenen Meeresbecken vermittelt den Eindruck einer fortschreitenden Gezeitenwelle. Da aber die einlaufende Gezeitenwelle am Ende des Beckens reflektiert wird, die Welle also wieder zurückläuft, folgt daraus, daß keine reinen fortschreitenden Wellen vorliegen können. Die Interferenz zweier gleichfrequenter Wellen entgegengesetzter Richtung ergibt die "stehende Welle". Als solche muß auch die Gezeitenwelle in solchen Meeresbecken angesehen werden. Stehende Wellen zeichnen sich durch Knoten und Bäuche aus. Infolge der ablenkenden Kraft der Erdrotation wird aber einmal das mit der Welle verschobene Wasser auf der Nordhalbkugel nach rechts, auf der Südhalbkugel nach links abgelenkt. Weiter bedingt die Einwirkung der Erdrotation, daß der Längsschwingung noch eine Querschwingung überlagert ist. Diese Einflüsse bedingen es, daß die Knotenlinie der Längsschwingung nicht erhalten bleiben kann, sondern sich in ein sternförmiges Herumwandern auflöst; auf der Nordhalbkugel entgegen dem Uhrzeigersinn, auf der Südhalbkugel im Uhrzeigersinn. Daraus ergeben sich wieder strahlenförmig angeordnete Flutstundenlinien, Amphidromieen oder Drehtiden genannt.

Die Beschreibung der Gezeiten als stehende Wellen hat natürlich nicht ihre Erklärung zum alleinigen Ziel. Dieser Betrachtung kommt schon insofern keine grundsätzliche Bedeutung zu, als durch geeignete Überlagerung stehender Wellen wieder fortschreitende Wellen entstehen können. Als stehende Wellen sind aber die Gezeiten ein "in Mittelwerten stationärer" Vorgang, wodurch die besonders interessierende, örtliche Verteilung des Tidehubs der analytischen Behandlung zugänglicher wird. Insofern ist diese Betrachtungsweise zweckmäßig, auch wenn eine andere physikalisch möglich ist.

Das Bild der Gezeiten, das hier ganz allgemein für einseitig geöffnete Randmeere aufgezeigt wurde, muß auch im Gezeitenbild der Nordsee zu verfolgen sein.

Die Nordsee hat im Verhältnis zu ihrer Länge eine große Breite und im Norden eine weite offene Verbindung zum freien Ozean. Von dieser Seite muß sie starke Impulse zum Mitschwingen erhalten. Die Straße von Dover kann wegen ihres kleinen Querschnitts nur unwesentlichen Einfluß haben.

Die Gezeit dringt von Norden als Kelvin-Welle in die

Nordsee ein. Bis zur Höhe der friesischen Inseln herrscht die sogenannte Schottische Welle, die an der deutschen Küste zurückgeworfen wird und sich mit der neu ankommenden Welle zu einer stehenden überlagert. Länge und Tiefe der Nordsee lassen zwei Knotenlinien erwarten, die eine zwischen Schottland und dem südlichen Norwegen, die zweite weiter südlich, quer durch die deutsche Bucht. Durch die ablenkende Kraft der Erdrotation werden die Knotenlinien in Drehtiden verwandelt, von denen jedoch nur diejenige vor der deutschen Küste voll zur Ausbildung kommt, während weiter nach Norden die zurückgeworfene Welle so schwach wird, daß die zweite äußere Drehtide nicht mehr zustande kommt und sich nur noch ganz östlich in einer Scharung der Flutstundenlinien auswirkt. Das Gezeitenbild der Nordsee wird deswegen vornehmlich von der einlaufenden Kelvin-Welle bestimmt.

Da über die Weite des Ozeans kein Beobachtungsmaterial von den Gezeiten vorhanden ist und nur die Gezeitenkonstanten und Partialtiden für eine Reihe von Küstenorten und Inseln vorliegen, bleibt die von Küstenwerten ausgehende Darstellung der Gezeiten für einen Ozean bis zu einem gewissen Grade spekulativ. Es ist deswegen naheliegend, die Gezeiten der Ozeane aus vergleichbaren Gezeitenbildern der Randmeere herzuleiten.

Aus der allgemeinen Struktur bietet sich der Vergleich zwischen Nordsee und Atlantischem Ozean an. Auch für den Atlantik kann man voraussetzen, daß das Gezeitenbild die Folge der Überlagerung von Längs- und Querschwingungen ist, wobei die Längsschwingungen sowohl selbständige als auch Mitschwinggezeiten (aus den Gezeitenimpulsen benachbarter Meere) sein werden, während die Querschwingungen auf die Wirkung der Erdrotation zurückzuführen sind.

In Analogie zur Nordsee ist anzunehmen, daß die Gezeitenwelle von Süden her in den Atlantischen Ozean eindringt, diesen durchläuft und ihre Energie auf den Schelfen der Arktischen Meere und der Eisbedeckung des Polarmeeres teilweise verbraucht. Die zurückgeworfene Welle ist dann schwächer als die eingedrungene und die Gezeiten können nicht mehr die Form einer einfachen stehenden Welle haben. Daraus erklärt sich, daß im Südatlantik die Flutwelle den Charakter einer fortschreitenden Welle hat, ähnlich den Verhältnissen in der nördlichen Nordsee, wo die zweite Drehtide nicht mehr richtig zustande kommt und beinahe das Bild der fortschreitenden Welle entsteht.

Es ist bekannt, daß die Gezeitenwelle auch in die Unterläufe der Flüsse eindringt. Die Grenze bis zu der die Gezeitenwelle reicht, heißt Flutgrenze. Während die Tidekurve an der Mündung noch weitgehend symmetrische Form hat, wird sie stromaufwärts zunehmend asymmetrisch. Einer kürzeren

Flutzeit folgt eine längere Ebbedauer. Daraus folgend sind auch die Geschwindigkeiten des Flut- und Ebbestromes verschieden.

Die flußaufwärts zunehmende Asymmetrie hat ihre Ursache in einer unterschiedlichen Fortschrittsgeschwindigkeit zwischen dem Scheitel der Flutwelle und dem Wellenfuß. Bei sehr starker Änderung des Wellenprofils der in den Fluß eindringenden Tidewelle kommt es zur sogenannten Flutbrandung. Die Flut nimmt die Form einer Sprungwelle an und wird Bore genannt. Die Erscheinung besteht darin, daß ein Wasserschwall auf breiter Front mauerartig auf ganzer Breite flußaufwärts wandert.

Die Erscheinungen der Bore sind nicht auf Flußläufe beschränkt. In seichten Meeresarmen und auch in den Prielen des Wattenmeeres ist die Erscheinung der Bore möglich. Das rasche Ansteigen des Wassers nach Niedrigwasser in den Prielen der deutschen Watten kann als Bore gedeutet werden.

In großen - um nicht zu sagen in groben - Zügen wurde versucht, die Erscheinung der Gezeiten und ihre Erklärung dem Verständnis näher zu bringen. Das Wort Erklärung ist aber vom Standpunkt der heutigen Naturwissenschaft mit einem Fragezeichen zu versehen; denn jede Erklärung endet bei etwas Unerklärlichem. Das Ziel der exakten Naturwissenschaften ist die von wenigen Grundaussagen ausgehende Vorausberechnung der Erscheinungen. Diesem Ziel folgt auch die Gezeitenforschung, wenn sie Verfahren entwickelt, um die Gezeiten bei Elimination der störenden meteorologischen Einflüsse aufgrund einer möglichst kleinen Anzahl von Beobachtungsdaten mit mathematischen Mitteln für jeden Ort und jeden künftigen Zeitpunkt zu bestimmen.

Schrifttum

- DEFANT, A. Ebbe und Flut des Meeres, der
 Atmosphäre und der Erdfeste,
 Berlin, Göttingen, Heidelberg 1953
- DIETRICH, G. u. Allgemeine Meereskunde,
KALLE, K. Berlin 1957
- TOLKMITT, G. Grundlagen der Wasserbaukunst,
 Berlin 1948
- KOHLRAUSCH, K.W.F. Ausgewählte Kapitel der Physik,
 Wien 1951
- THORADE, H. Ebbe und Flut der Nordsee, ein
 geschichtlicher Rückblick,
 Hamburg 1930
- THORADE, H. Die Gezeiten als stehende Wellen
- MACH, E. Die Mechanik in ihrer Entwicklung,
 Leipzig 1933
- WOHLWILL, E. Galilei und sein Kampf für die
 Copernikanische Lehre,
 Hamburg und Leipzig 1909
- ROSE, D. Über die quantitative Ermittlung der
 Gezeiten und Gezeitenströme in Flach-
 wassergebieten usw.
 Mitteilungen des Franzius-Instituts
 Hannover 1960